

# Pro Электромагнитный импульс



**В. И. Гуревич,**  
кандидат технических наук

## Аннотация:

Проблемы, связанные с воздействием электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва (ЭМИ ЯВ) на электронное и электротехническое оборудование, обсуждаются в последнее время в специальной технической литературе очень интенсивно. Основная масса технической литературы на эту тему публикуется на английском языке. Десятки правительственных организаций в США и в Европе интенсивно работают над этой проблемой уже не один десяток лет, выпуская подробные многостраничные отчеты. Однако для большинства инженерно-технических работников, работающих в различных отраслях промышленности и, в первую очередь, в электроэнергетике, эта тема остается до сих пор вне сферы внимания, поскольку они об ЭМИ ЯВ или вообще ничего не слышали, или знают об этом явлении понаслышке. В этой связи, автор поставил перед собой задачу ознакомить инженеров, в первую очередь, в области электроэнергетики с современными представлениями об ЭМИ ЯВ.

Ключевые слова: электромагнитный импульс, ЭМИ ЯВ, высотный ядерный взрыв

## 1. Насколько современны «современные представления»

Следует сразу же отметить, что современные представления об ЭМИ ЯВ не только основываются на результатах испытаний и исследований этого явления, полученных при ядерных испытаниях, проведенных более 50 лет тому назад, но и практически не отличаются от них. Все основные параметры ЭМИ ЯВ, которые сегодня прописаны в открытых военных и гражданских стандартах без всяких ссылок на источники информации заимствованы из старых, ранее засекреченных отчетов об испытаниях и исследованиях (собственно, поэтому и отсутствуют ссылки на них). Например, все основные данные и кривые, приведенные в стандарте Международной электротехнической комиссии (МЭК) IEC 61000-2-9 [1] автор этих строк обнаружил в таких старых отчетах, без ссылок на них. Также большинство последних (написанных в 80 – 90 годах прошлого века), уже открытых отчетов по этой теме, подготовленных различными организациями, содержат большое количество рисунков, кривых, таблиц, заимствованных из этих старых, в прошлом секретных, отчетов. Большинство современных книг (например, [2]) на эту тему представляют собой вольный перевод и пересказ данных уже из этих более поздних открытых отчетов (например, [3]).

По изложенным выше причинам, приводя сегодня ссылки на использованные по теме источники, нельзя быть уверенным, что это действительно первоисточник информации, а не многоступенчатое заимствование.

*Владимир Игоревич Гуревич (р. 1956, Харьков, Украинская ССР, СССР) – известный ученый-электротехник, кандидат технических наук, доцент, почетный профессор, автор 15 книг[1], изданных на русском и английском языках, свыше 200 научно-технических статей[2], более 100 изобретений[3], автор нового вида высоковольтных изолирующих интерфейсов «Геркотронов». В. И. Гуревич первым в странах постсоветского пространства поднял вопрос о кибербезопасности для микропроцессорных устройств релейной защиты и опасности преднамеренных деструктивных электромагнитных воздействий.*

*В настоящее время – ведущий специалист (Senior Specialist) Электрической компании Израиля, начальник сектора Центральной электрической лаборатории.*

*В. И. Гуревич является экспертом Технического Комитета SC77C (High Power Transient Phenomena) Международной Электротехнической Комиссии – МЭК (Стандарты в области защиты гражданского оборудования от электромагнитного импульса высотного ядерного взрыва – ЭМИ ЯВ, а также от других источников преднамеренных электромагнитных деструктивных воздействий – ПЭДВ)*

Википедия

## 2. Физические процессы, лежащие в основе ЭМИ ЯВ

Физические процессы, сопровождающие подрыв ядерного боеприпаса на большой высоте, очень сложны и их точное знание вовсе не обязательно для специалистов в области электроэнергетики. Более того, начав здесь строгое описание физических процессов с неизбежным привлечением сложного математического аппарата, можно лишь отпугнуть читателя и заставить его пропустить данный раздел. Автору очень не хотелось бы этого, поэтому он приводит ниже теорию ЭМИ ЯВ и описание его основных параметров так сказать, в популярной форме, рассчитанной на инженеров-электриков, а не на физиков-ядерщиков.

В соответствии с классификацией Международной электротехнической комиссии – МЭК (позаимствованной из секретного военного стандарта MIL-STD-2169) выделяют три компонента ЭМИ ЯВ: E1, E2 и E3, рис. 1.

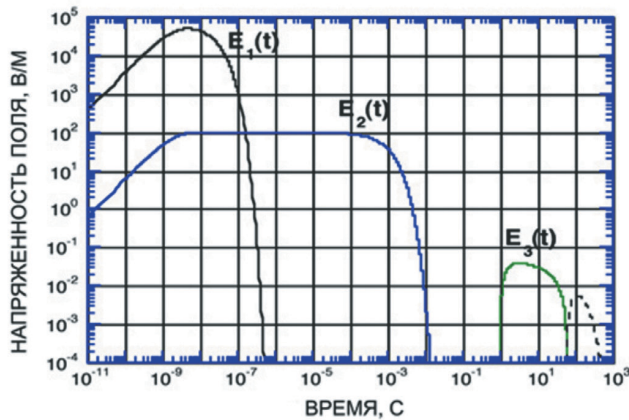


Рис. 1. Параметры компонентов E1, E2 и E3 высотного ядерного взрыва в соответствии с (IEC 61000-2-9)

**E1** – самый «быстрый» и самый «короткий» компонент ЭМИ ЯВ, обусловленный мощным рентгеновским излучением ( $\gamma$ -квантами или рентгеновскими фотонами), возникающим при подрыве ядерного боеприпаса, которое взаимодействует с атомами воздуха, выбивая из последних свободные электроны (так называемые «комптоновские рассеянные электроны»), рис. 2. Эти электроны захватываются магнитным полем Земли и по спирали устремляются с околосветовой скоростью по направлению к поверхности земли. Направленный поток электронов – это электрический ток, образующий магнитное поле. Быстро изменяющийся от нуля до амплитудного значения всплеск магнитного поля создает мощный всплеск (импульс) электрического поля, описываемый уравнениями Максвелла, который при ядерном взрыве достигает у поверхности земли напряженности в 50 кВ/м.

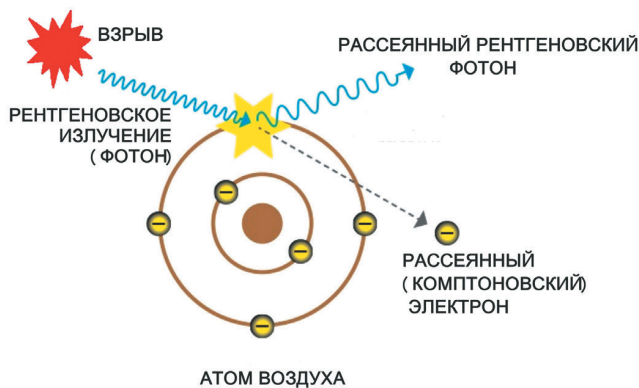


Рис. 2. Образование комптоновских свободных электронов при ядерном взрыве в воздухе

Это взаимодействие очень быстро движущихся отрицательно заряженных электронов с магнитным полем производит импульс электромагнитной энергии, сконцентрированной магнитным полем Земли и направленной с высоты на Землю. По определению МЭК, полная продолжительность импульса ЭМИ ЯВ может составлять около одной микросекунды (1000 наносекунд).

Компонент E1 обусловлен самым интенсивным электромагнитным полем, вызывающим очень высокие перенапряжения в электрических цепях, он создает вблизи уровня земли на умеренно высоких широтах импульсные напряжения до 50 кВ/м при плотности мощности около

6,6 МВт на квадратный метр. Компонентом E1 обусловлено большинство повреждений электронного оборудования, связанных с воздействием перенапряжений и электрическим пробоем р-п-переходов полупроводниковых элементов и изоляции. Обычные разрядники, эффективные для защиты от атмосферных перенапряжений, не всегда успевают сработать и защитить оборудование при воздействии компонента E1.

Следует отметить, что Комптоновская модель, описанная в [4] основана на некоторых предположениях, которые не следуют из принципов существующей электродинамики и поэтому подвергается сомнению некоторыми авторами. Тем не менее, эта модель считается сегодня общепринятой (другой просто нет).

Классическая электродинамика Дж. Томпсона предполагала лишь волновую природу света. Под действием такой волны, падающей на электрон, он должен колебаться с частотой, равной частоте поля (то есть длине волны падающего света) и излучать вторичные (рассеянные) волны той же частоты. То есть, при «томпсоновском» рассеянии в этом процессе не должны присутствовать волны какой-то другой частоты. Однако при исследовании Артуром Комптоном, рис. 3, рассеяния рентгеновских лучей на парафине, им было обнаружено, что рассеянные в парафине рентгеновские лучи имеют большую длину волны, чем падающие рассеянные лучи, то есть, наряду с излучением первоначальной длины волны, было зарегистрировано также излучение с большей длиной волны.

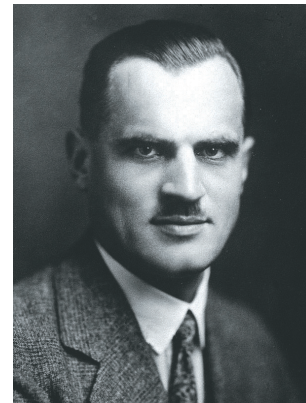


Рис. 3. Лауреат Нобелевской премии по физике Артур Холли Комптон (Arthur Holly Compton)

*Теоретическое объяснение этому явлению было дано А. Комптоном (а затем и независимо от него П. Дебаем) на основе корпускулярной теории света, предложенной А. Эйнштейном в 1905 г. Действительно, если принять, что световое излучение представляет собой поток частиц (корпускул) – фотонов, то эффект Комптона есть результат упругого столкновения рентгеновских корпускул - фотонов со свободными электронами вещества. У легких атомов рассеивающих веществ электроны слабо связаны с ядрами атомов, поэтому их можно считать свободными. В процессе столкновения фотон передает электрону часть своей энергии и импульса в соответствии с законами сохранения энергии. При этом потеря фотонной части энергии регистрируется в эксперименте как уменьшение частоты излучения (увеличение длины волны). Это увеличение длины волны получило название «комптоновского смещения». За это открытие, подтверждающее двойственную (корпускулярно-волновую) теорию света А. Комптон был удостоен 1927 г. Нобелевской премии по физике.*

**E2** – это «промежуточный» по скорости нарастания и длительности компонент ЭМИ, возникающий как вторичный эффект движения комптоновских электронов в магнитном поле Земли. По своим параметрам компонент E2 имеет много общего с электромагнитными импульсами, атмосферного происхождения (то есть, близкой молнией). Напряженность поля E2 может достигать 100 В/м. Из-за сходства параметров компонента E2 с молнией и хорошо отработанными технологиями защиты от молнии, считается, что защита от компонента E2 не представляет проблемы.

**E3** (или магнитогидродинамический эффект ЭМИ ЯВ) – это компонент очень сильно отличающийся от двух других основных компонентов ЭМИ. Это очень «медленный» импульс, длящийся десятки-сотни секунд, обусловленный смещением и последующим восстановлением магнитного поля Земли. Компонент E3 имеет сходство с геомагнитной бурей, вызванной очень интенсивной солнечной вспышкой. Геомагнитные индуцированные токи – это токи, протекающие в земле, вызванные геомагнитными возмущениями в магнитосфере Земли.

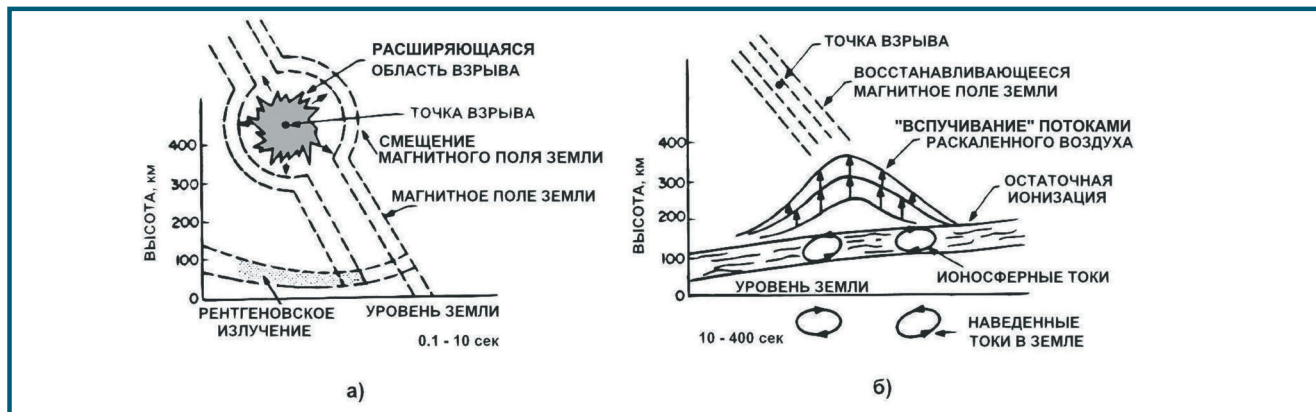


Рис. 4. Две стадии магнитогидродинамического эффекта ЭМИ ЯВ [5]: а) «взрывная волна», б) «вспучивание»

В основе компонента E3 лежат магнитогидродинамические эффекты взаимодействия плазмы продуктов ядерного взрыва и разогретого ионизированного воздуха с магнитным полем Земли. Различают две стадии этого эффекта, называемые в зарубежной литературе “Blast Wave” («взрывная волна») и “Heave” («вспучивание»), с отличающимися механизмами образования и длительностью, рис. 4. Первая стадия с длительностью до 1 - 10 с обусловлена разлетом больших плазменных субстанций, образующихся при взрыве в разреженном воздухе (на большой высоте) и в присутствии магнитного поля Земли. При этом происходит сложное взаимодействие между ионами плазмы, магнитным полем, гамма- и рентгеновским излучениями, сопровождающееся образованием вихревого электрического поля.

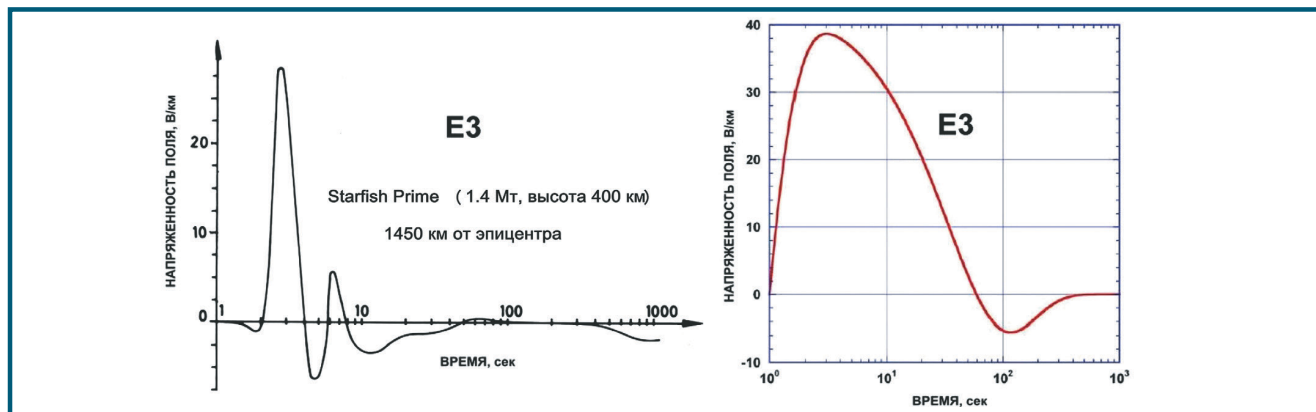


Рис. 5. Изменение напряженности горизонтальной составляющей электрического поля на поверхности Земли в результате воздействия компонента E3 ЭМИ ЯВ: слева – импульс, зарегистрированный во время испытательного взрыва по проекту Starfish Prime; справа – стандартный импульс (в соответствии со стандартом IEC 61000-2-9 [1])

Эти физические эффекты приводят к сильному смещению магнитного поля Земли, которое тем сильнее, чем мощнее энергия взрыва и высота взрыва над поверхностью Земли. На второй стадии происходит вспучивание и быстрый подъем вверх раскаленных в результате взрыва и сильно ионизированных масс воздуха, то есть, фактически, плазмы. Пересечение ионизированной плазмой силовых линий магнитного поля Земли сопровождается поляризации воздушного слоя и генерацией мощного электрического поля, которое, в свою очередь, формирует сильные циркулирующие токи в ионосфере. Процессы эти относитель-

но медленные. Длительность этой фазы взрыва составляет 10 – 300 сек. Результатом всех этих процессов в разреженной атмосфере является возникновение у поверхности Земли относительно медленно изменяющегося электрического поля с напряженностью в единицы-десятки вольт на километр, рис. 5. Несмотря на небольшую напряженность электрического поля, вызванного компонентом E3 ЭМИ ЯВ, оно наводит в протяженных металлических предметах (трубах, рельсах, проводах ЛЭП) довольно сильные электрические токи очень низкой частоты (менее 1 Гц),



то есть, квазипостоянные токи, которые представляют опасность для силового электрооборудования, не предназначенного для работы с постоянными токами (трансформаторы, генераторы).

Следует отметить, что при всей его опасности и для электронного, и для силового электротехнического оборудования, энергия ЭМИ ЯВ не такая уж и высокая и составляет менее 1% от энергии, выделяющейся при ядерном взрыве (ЯВ). Во всяком случае, энергия ЭМИ ЯВ меньше энергии, выделяющейся при ударе молнии, рис. 6.

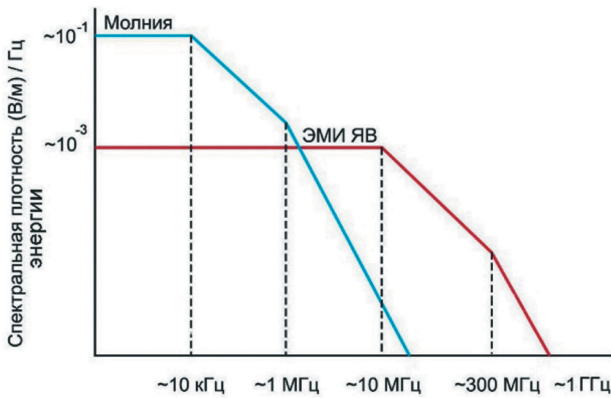


Рис. 6. Энергия молнии и ЭМИ ЯВ

Поэтому с 80-х годов прошлого столетия в ряде стран мира усиленно работают над созданием так называемого «Супер-ЭМИ» ядерного заряда с усиленным выходом электромагнитного излучения. Работы ведутся в основном в двух направлениях: за счет создания вокруг заряда специальной оболочки из вещества, дополнительно испускаю-

щего  $\gamma$ -излучение (рентгеновские фотоны) высокой энергии при облучении его нейтронами ядерного взрыва, а также за счет фокусировки  $\gamma$ -излучения. По расчетам специалистов, с помощью Супер-ЭМИ можно будет значительно усилить компонент E1, за счет чего создать напряженность поля у поверхности Земли порядка сотен и даже тысяч киловольт на метр. Причем, военные и не скрывают, что главными целями такого ЭМИ оружия в будущих конфликтах будут системы государственного и военного управления, а также национальная инфраструктура, включающая системы электро- и водоснабжения, связи.

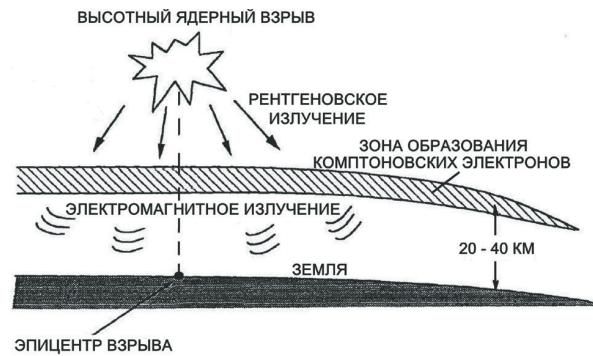


Рис. 7. Образование импульса электрического поля у поверхности земли при высотном ядерном взрыве

Рисунок 7 (с английским текстом) кочует из одного отчета в другой, из одного стандарта – в другой, однако, первоисточником его является сов. секретный отчет № AD-A955391 [6], написанный 40 лет тому назад, рис. 8.

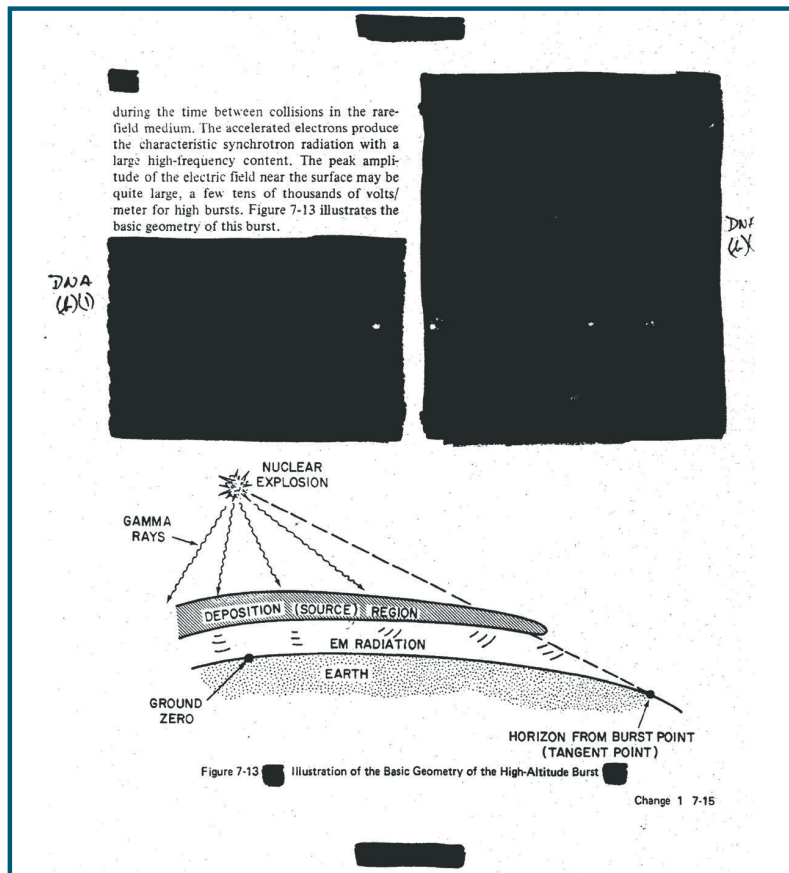


Рис. 8. Страница из частично рассекреченного (точнее «вычищенного»): «sanitized version», с зачеркнутыми грифами «Top Secret» вверху и внизу каждой страницы отчета № AD-A955391 («Capabilities of Nuclear Weapons», DNA-EM-1, 1978), глава 7 которого посвящена ЭМИ ЯВ и его характеристикам

Поскольку наиболее опасным для электронного и электротехнического оборудования по общему признанию является компонент E1, рассмотрим его свойства и параметры более подробно.

Оказалось, что в атмосфере существует некая область (deposition region), расположенная на высоте 20 – 40 км (стратосфера) в которой происходит образование максимального количества электронов от рентгеновского излучения, воздействующего на эту зону сверху и от вторичных электронов, выбитых из атомов воздуха Комптоновскими электронами, рис. 7. Каждый Комптоновский электрон обладает энергией около 1 млн. электрон-вольт (MeV) и производит на своем пути в воздухе около 30.000 вторичных пар электрон-ион из атомов воздуха, которые и образуют эту электропроводную область [7].

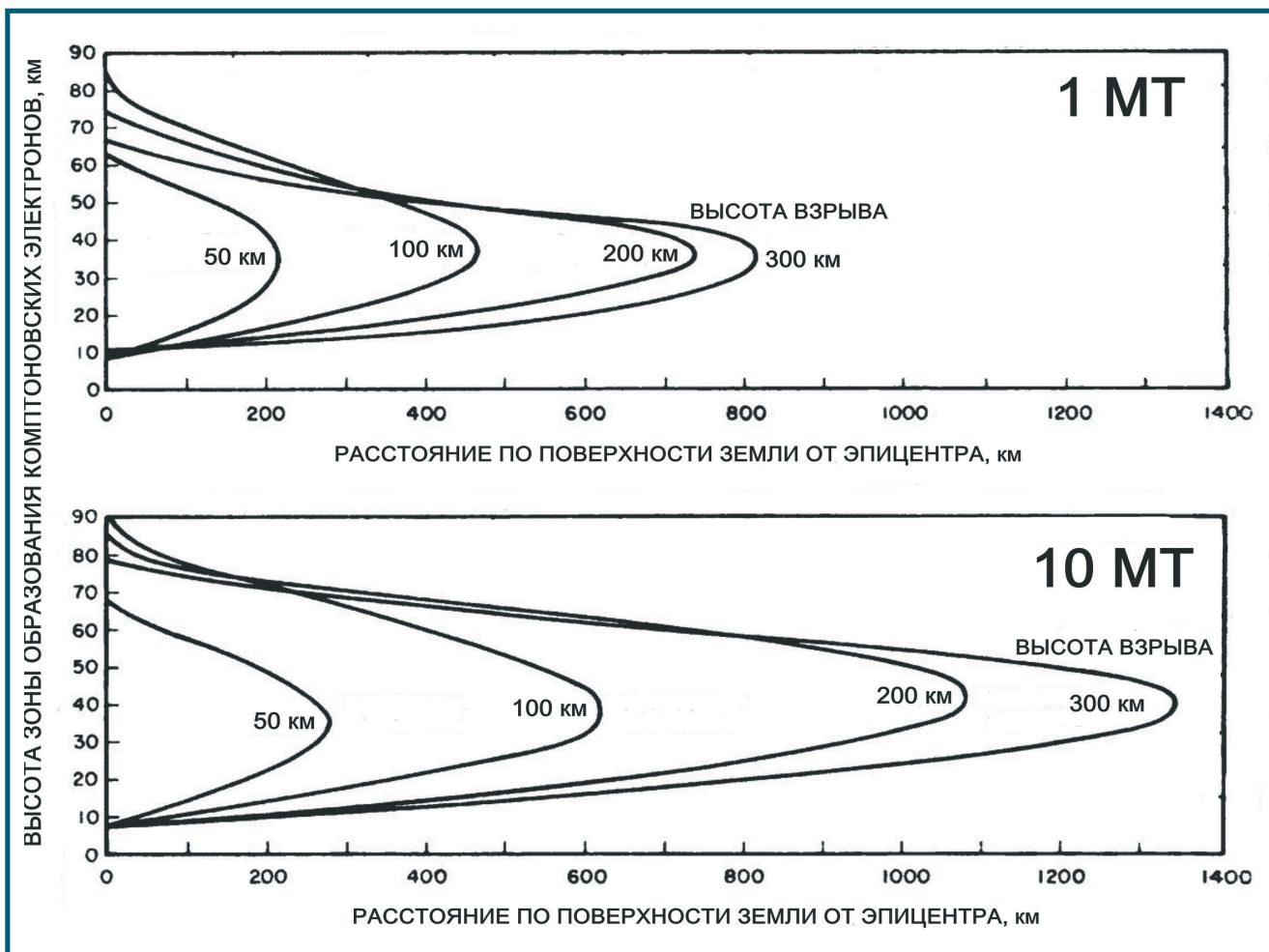


Рис. 9. Увеличение зоны образования комptonовских электронов с увеличением мощности заряда и высоты его подрыва: сверху для заряда 1 МТ, внизу – 10 МТ [8]

Эта зона остается практически неизменной по высоте для зарядов различной мощности, но ее радиус существенно расширяется с увеличением мощности заряда и высоты его подрыва, рис. 9 [8].

Однако, плотность воздуха на разных высотах разная и это не может не сказаться на свойствах возникающего импульса электрического поля. Оказалось, что при большой высоте подрыва ядерного заряда (ЯЗ) в сильно разреженной атмосфере, количество атомов воздуха мало и, следовательно, количество образующихся свободных электронов также мало. Кроме того, путь пробега этих свободных электронов до зоны образования комptonовских электронов настолько велик, что большинство из них успевают на этом пути рекомбинировать и поэтому импульс электрического поля у поверхности земли получается ослабленным. И наоборот, при низком ЯВ в плотных слоях атмосферы, то есть ниже слоя образования комptonовских электронов, количество этих электронов снижено, путь свободных электронов к поверхности земли сильно затруднен и также сопровождается усиленной рекомбинацией, что, опять-таки, приводит к ослаблению импульса электрического поля у поверхности земли. По некоторым данным, попав-

шим в открытые отчеты, существует некая оптимальная высота ЯВ, при которой напряженность электрического поля у поверхности земли максимальна, рис. 10.

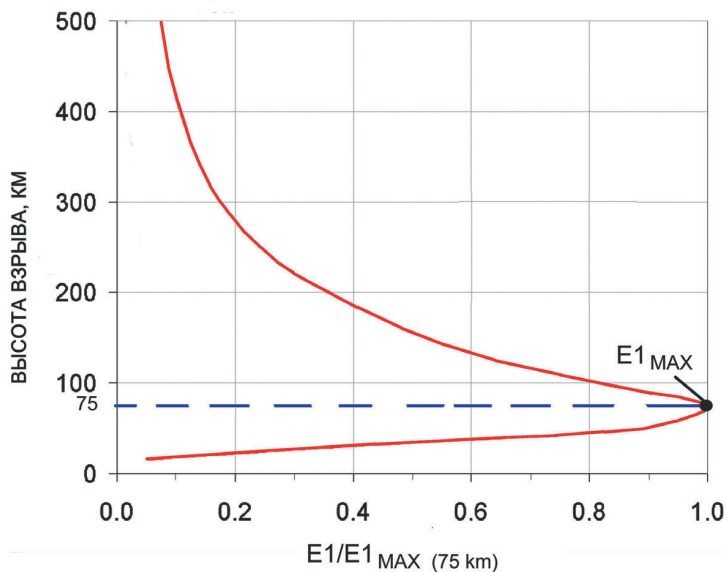


Рис. 10. Зависимость напряженности электрического поля компоненты E1 у поверхности земли от высоты ЯВ

Но, поскольку рентгеновское излучение от точки взрыва распространяется по прямой и не следует за кривизной Земли, то радиус зоны воздействия ЭМИ ограничивается расстоянием от точки взрыва до горизонта. Совершенно очевидно, что с увеличением высоты ЯВ будет увеличиваться и зона влияния ЭМИ ЯВ на наземное электрооборудование, рис. 11.

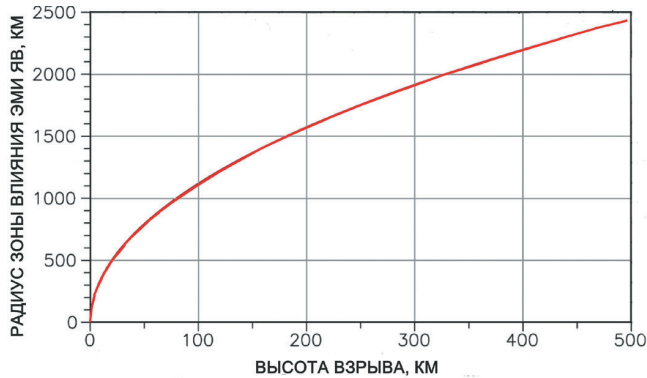


Рис. 11. Зависимость зоны влияния ЭМИ ЯВ от высоты взрыва

Однако, зона влияния, это еще не зона поражения, так как одновременно с расширением зоны влияния ЭМИ ЯВ за счет увеличении высоты взрыва, происходит ослабление электрического поля у поверхности земли. Кроме того, совершенно очевидно, что эта напряженность электрического поля будет в сильной степени зависеть также и от мощности ядерного заряда, рис. 12. Более того, из графика на рис. 12 хорошо видно, что и оптимальная высота взрыва не есть величина постоянная. Она увеличивается с увеличением мощности ядерного заряда.

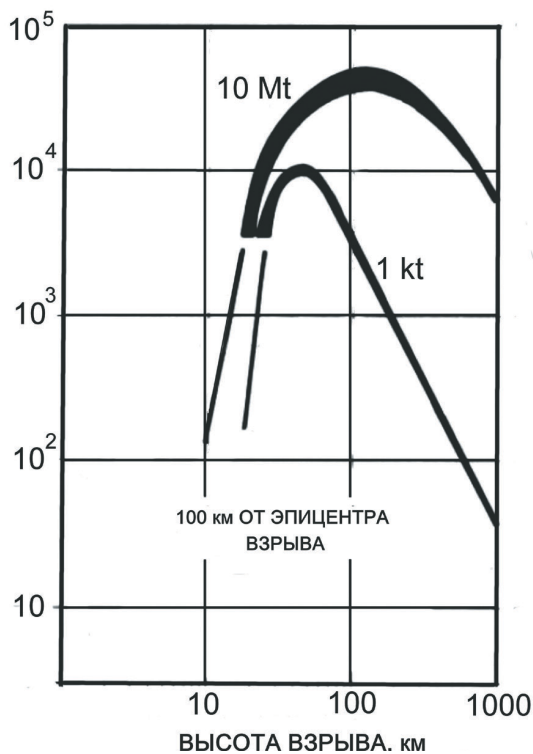


Рис. 12. Зависимость напряженности электрического поля ЭМИ ЯВ от высоты взрыва и мощности ядерного заряда

Но и это еще далеко не все. Экспериментальные измерения напряженности электрического поля на различных расстояниях от эпицентра взрыва дали очень странную картинку, рис. 13 [6]. Вопреки ожиданиям и здравому смыслу, оказалось, что непосредственно в эпицентре взрыва напряженность поля минимальна (зона А), а максимальное его значение получается где-то в стороне от эпицентра (зона В на рис. 13.)

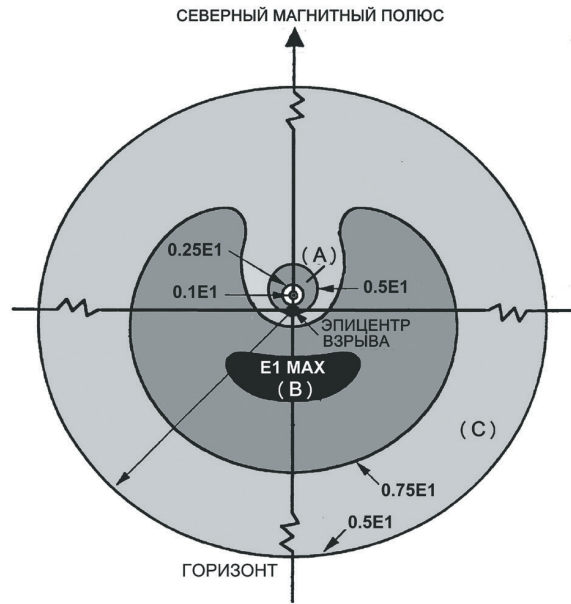


Рис. 13. Распределение напряженности электрического поля компонента E1 ЭМИ ЯВ на различном удалении от эпицентра (для ЯВ, произведенного на высотах от 100 до 500 км с эпицентром, расположенным между 30 и 60 градусами северной широты) [6]

Причем, не только амплитуда напряженности электрического поля имеет разные значения в этих приземных областях, но также форма и длительность импульса E1, рис. 14.

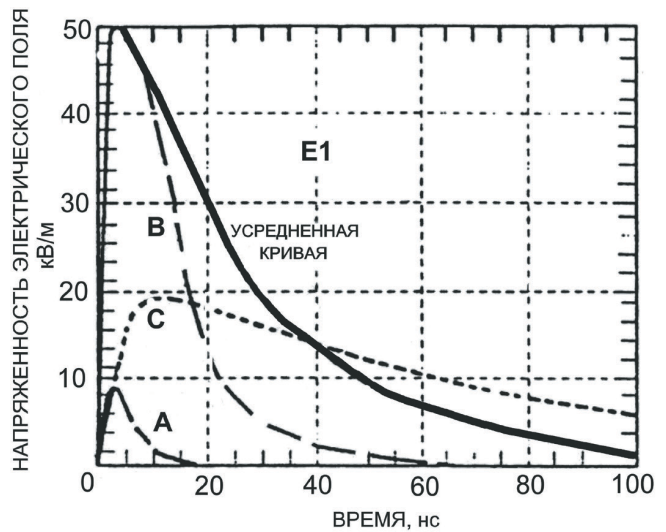


Рис. 14. Форма и длительность импульса электрического поля компонента E1 в различных зонах на поверхности земли

Поэтому, для общего применения была рассчитана некая усредненная кривая составляющей E1, рис. 13, которая и применяется сегодня как стандартная кривая импульса E1 с временными параметрами 2.5/23 нс и амплитудой 50 кВ/м, рис. 14. Что такое 2.5/23 нс? Это некая условная величина, характеризующая форму импульса.

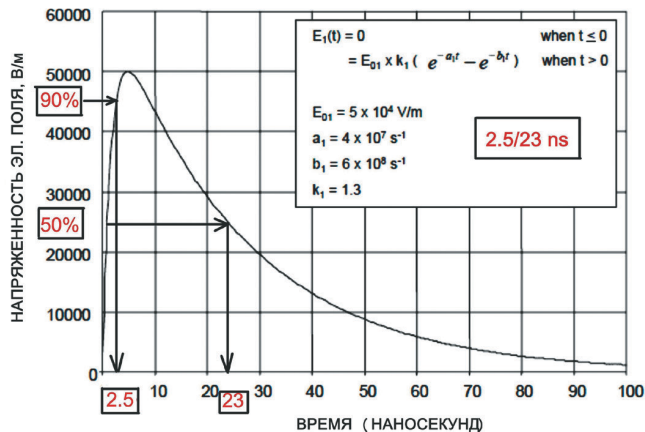


Рис. 15. Стандартная форма импульса E1 ЭМИ ЯВ [6]

Она представляет собой отношение времени нарастания импульса (передний фронт) рассчитываемое как время, в течение которого величина импульса возросла с 10% до 90% (2.5 нс) амплитудного значения (к ширине импульса на уровне половины амплитуды (23 нс, а в некоторых стандартах – 25 нс)), рис. 16.

Однако, рассчитана она была далеко не сразу. Различные авторы выдавали существенно различающиеся между собой параметры импульса, рис. 17, табл. 1.

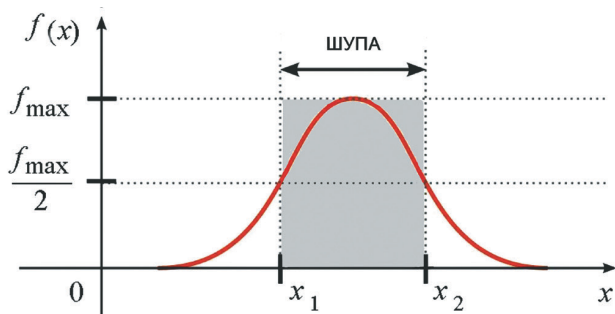


Рис. 16. К пояснению величины, называемой «ширина импульса на уровне половины амплитуды» (FWHM – full width at half maximum)

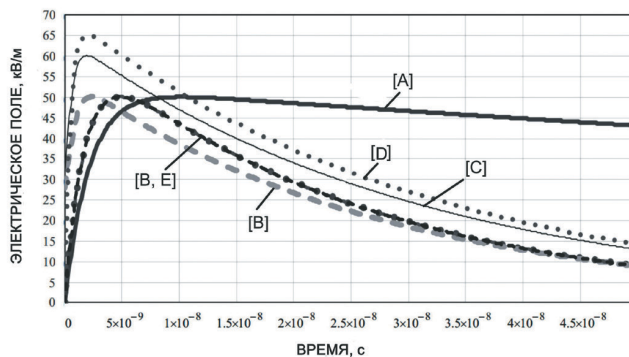


Рис. 17. Форма ЭМИ ЯВ, предложенная в разное время различными авторами

**Табл. 1. Параметры ЭМИ ЯВ, предложенная в разное время различными авторами**

Параметр	Источник	Bell Labs 1960 A [9]	Baum 1992 B [10]	Leuthäuser 1994 C [11]	VG95371-10 1995 D [12]	IEC 61000-2-9 1996 E [1]
Амплитуда, кВ/м		50	50	60	65	50
Передний фронт, нс		4.6	2.5	1.9	0.9	2.5
Ширина импульса на уровне половины амплитуды, нс		184	23	23.8	24	23
Плотность энергии, Дж/м		0.891	0.114	-	0.196	0.114

Но, в конце-концов, была принята версия, изложенная в стандартах MIL-STD-464A и IEC 61000-2-9, то есть импульс E1 ЭМИ ЯВ приобрел общепринятую форму, показанную на рис. 14.

Однако, и здесь не все так просто, ведь энергия импульса в значительной степени зависит от формы импульса. То есть, меньшая амплитуда импульса в зоне А на рис. 12 еще не говорит о том, что и энергия импульса в этой зоне будет меньшей. Из исследования, выполненного в [13] следует, что скорее всего эта энергия не уменьшится, рис. 18, поскольку более широкие и пологие импульсы малой амплитуды обладают такой же энергией, как и более короткие и крутые импульсы с большой амплитудой.



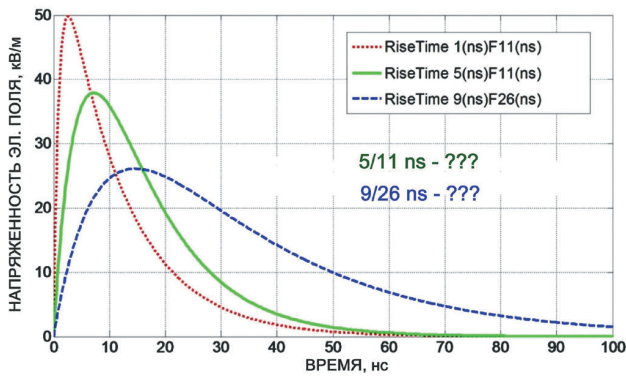


Рис. 18. Расчетные импульсы ЭМИ ЯВ разной формы с одинаковой энергией

Здесь, правда, следует отметить, что указанные авторами [13] значения F (Fall Time) – задний фронт или время спада импульса не используются для обозначения параметров ЭМИ ЯВ (также, как и грозового импульса), а используется параметр, называемый «ширина импульса на уровне половины амплитуды». Более того, даже если допустить использование величины времени спада импульса (это время, в течение которого величина сигнала снижается от 90% амплитуды до 10% амплитуды), то даже и в этом случае приведенные на этом графике значения никак не соответствуют самим графикам. Обращение ко всем трем авторам статьи [12] с просьбой объяснить ситуацию не дали результата: ни один из авторов не соизволил ответить.

Разложение в ряд Фурье стандартной кривой импульса E1 (рис. 19) по данным [3], показывает, что в диапазоне частот от 10 кГц до 1 МГц напряженность электрического поля остается относительно постоянной и максимальной, но быстро уменьшается (почти в 10 раз) при увеличении частоты от 1 МГц до 100 МГц и еще быстрее уменьшается при частотах выше 100 МГц, рис. 19.

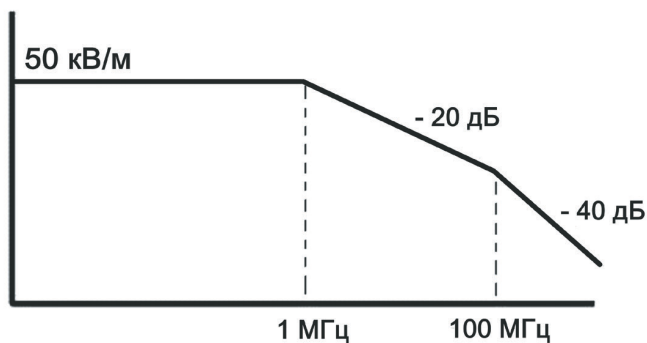


Рис. 19. Распределение напряженности электрического поля по частотному диапазону при разложении в ряд Фурье стандартного импульса E1

Поэтому, частотный диапазон ЭМИ ЯВ стандарт IEC 61000-2-9 [1] определяет в пределах 100 кГц – 100 МГц, в которых выделяется 96% энергии импульса, рис. 20.

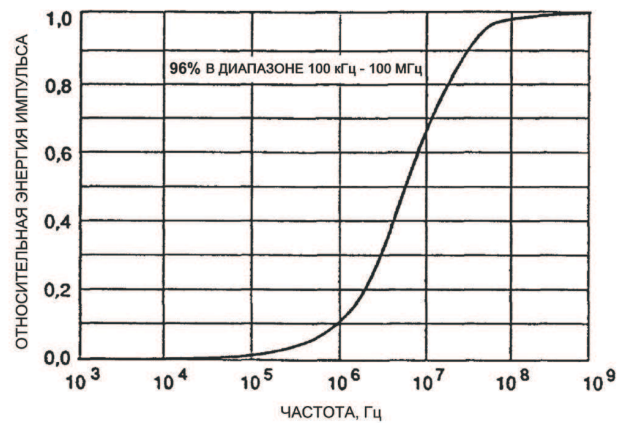


Рис. 20. Распределение энергии по частотному диапазону ЭМИ ЯВ [1]

В довольно необычной, но наглядной форме частотный диапазон ЭМИ ЯВ представлен в [14], рис. 21.

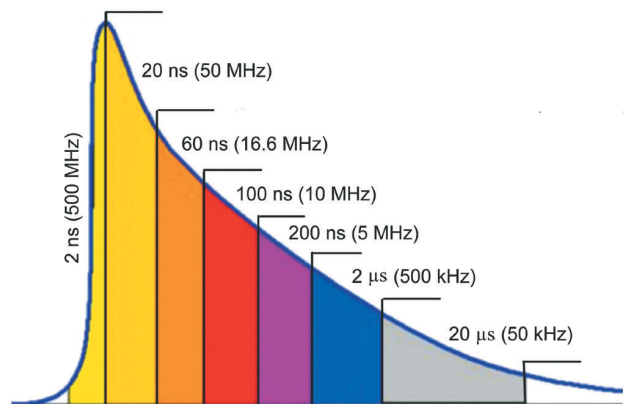


Рис. 21. Частотный диапазон ЭМИ ЯВ по версии [13]

Но, все же, с чем связана такая странная форма (рис. 12) распределения электрического поля от эпицентра ЯВ? Поскольку в процессе образования ЭМИ самую непосредственную роль играет магнитное поле Земли, то ответ на этот вопрос очевиден: магнитное поле Земли. Оказывается, магнитное поле Земли имеет довольно занимательную структуру и форму. Во-первых, магнитные полюса Земли не совпадают с географическими полюсами и имеют тенденцию к медленному перемещению. Во-вторых, величина магнитного поля различна в разных точках земной поверхности. Чем оно слабее, тем меньше будет интенсивность ЭМИ ЯВ. В-третьих, векторы горизонтальной составляющей и вертикальной составляющей индукции магнитного поля имеют определенные углы. Угол между географическим и магнитным меридианами в определенной точке земной поверхности, который показывает отличие между показаниями магнитного компаса и истинным направлением на север в данной точке земной поверхности, называется магнитным склонением. Угол, на который отклоняется стрелка компаса под действием магнитного поля Земли в вертикальной плоскости, называется магнитным наклонением. В северном полушарии указывающий на север конец стрелки отклоняется еще и вниз (то есть к поверхности Земли), в южном — вверх. Для измерения магнитного наклонения используют прибор, называемый инклинаметр.



На рис. 22 показана карта изолиний интенсивности общего магнитного поля на поверхности Земли. Изолиния представляет собой линию, в каждой точке которой измеряемая величина сохраняет одинаковое значение.

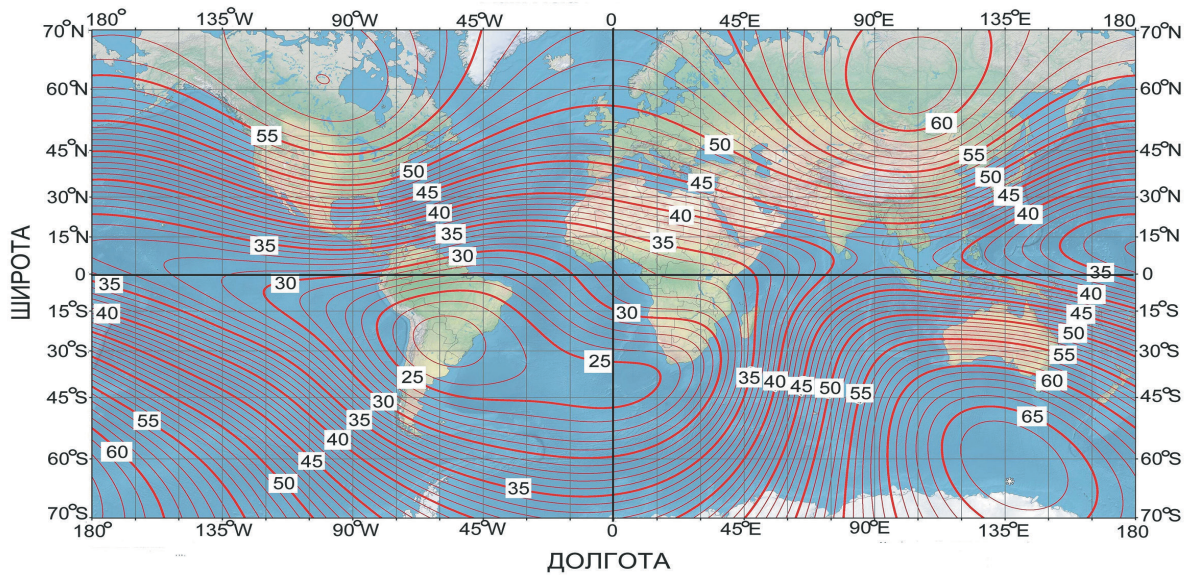


Рис. 22. Карта изолиний общего магнитного поля ( $\mu\text{T}$ ) на поверхности Земли

Поскольку, как было показано выше, в процессе образования ЭМИ ЯВ непосредственно участвует магнитное поле Земли, а оно, как известно, отличается своей неравномерностью, то по расчетам, представленным в [15] получается, что один и тот же по мощности и высоте подрыва ядерный заряд будет создавать у поверхности земли электромагнитный импульс, существенно отличающийся по амплитуде электрического поля и по энергии, в зависимости от положения (геомагнитной широты) эпицентра взрыва, рис. 23.

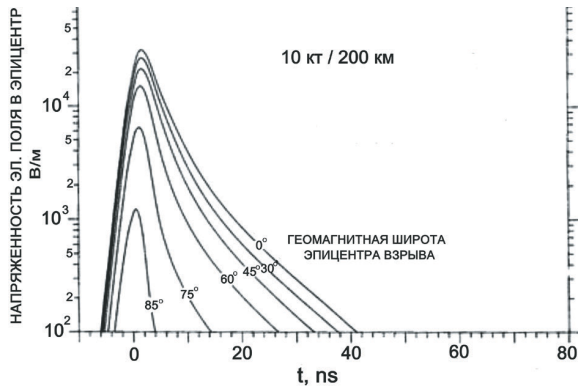


Рис. 23. Изменение напряженности электрического поля ЭМИ ЯВ в зависимости от широты в северном полушарии для заряда мощностью 10 кт и высоты подрыва 200 км.

Еще больше осложняет дело тот факт, что рассматриваемая до сих пор форма импульса ЭМИ ЯВ с параметрами 2.5/25 (2.5/23) нс относится к импульсу напряжения, прикладываемому к аппаратуре. Но импульс тока, который начинает протекать под действием этого приложенного импульса напряжения имеет совершенно другую форму: 10/100 нс (IEC 61000-5-3, IEC 61000-2-10), рис. 24.

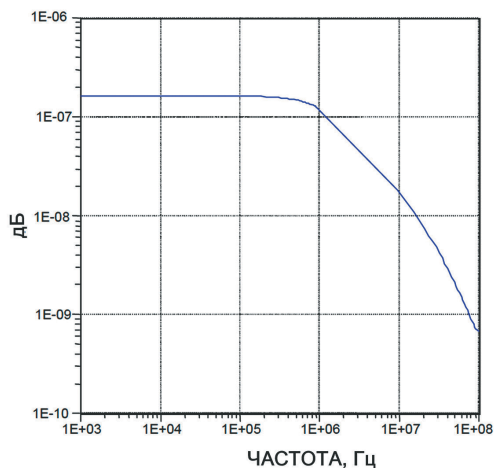
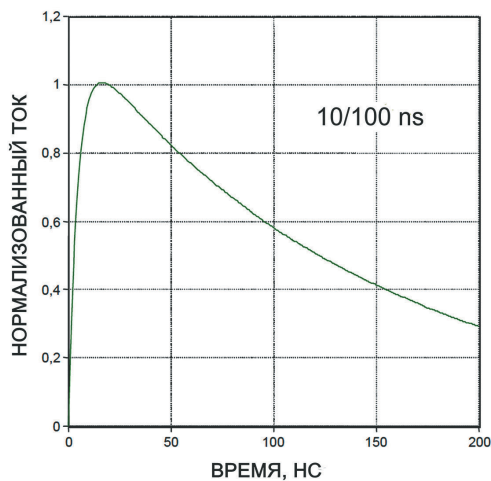


Рис. 24. Стандартная форма импульса тока ЭМИ ЯВ

Форма импульса тока будет очень сильно зависеть от характера нагрузки, то есть индуктивности и емкости цепи тока. Однако, для упрощения дела была принята некая усредненная стандартная форма импульса тока с параметрами 10/100 нс.

Еще сложнее обстоит дело с электрическими кабелями, проходящими в земле, поскольку грунт является полупроводящей средой, частично отражающей падающую на него электромагнитную волну, частично шунтирующей ЭМИ. Очевидно, что степень влияния грунта на ослабление ЭМИ ЯВ, действующего на кабели, будет существенно зависеть от его электропроводности, а также от глубины залегания кабелей, рис. 25.

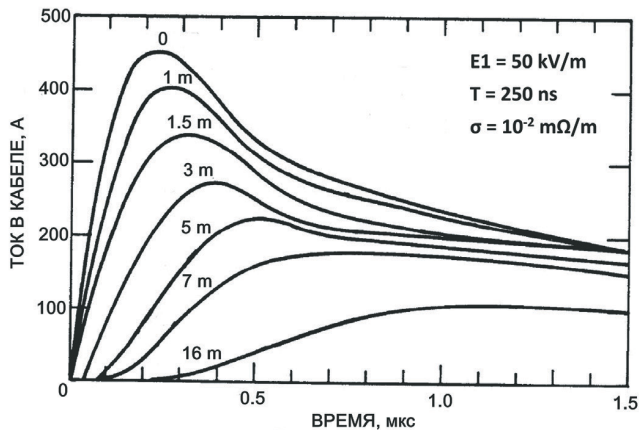


Рис. 25. Влияние глубины залегания кабеля в земле на форму импульса тока, наведенного стандартным ЭМИ ЯВ (50 кВ/м) для грунта с проводимостью  $\sigma = 10^{-2}$  мОм/м

Из всего вышеизложенного должно быть понятно, что принятые в стандартах значения, описывающие ЭМИ ЯВ, являются очень сильно усредненными и обобщенными и на самом деле очень далеки от реальных значений, которые могут иметь место в реальных условиях для

реальных электроустановок. Единственное, что при этом успокаивает, так это то, что в большинстве случаев в стандартах указаны значения, соответствующие наиболее тяжелому случаю и в реальных условиях воздействия ЭМИ ЯВ на аппаратуру будут слабее, описанных в стандартах. Тем не менее, для военных целей еще в 1985 г. Министерством обороны США был разработан специальный стандарт MIL-STD-2169, который с тех пор неоднократно пополнялся и корректировался, в котором все многообразие рассмотренных выше взаимосвязей представлено в виде номограмм, позволяющих рассчитывать влияние ЭМИ ЯВ на объекты, расположенные в различных условиях. К сожалению, этот стандарт до сих пор является секретным, рис. 26.

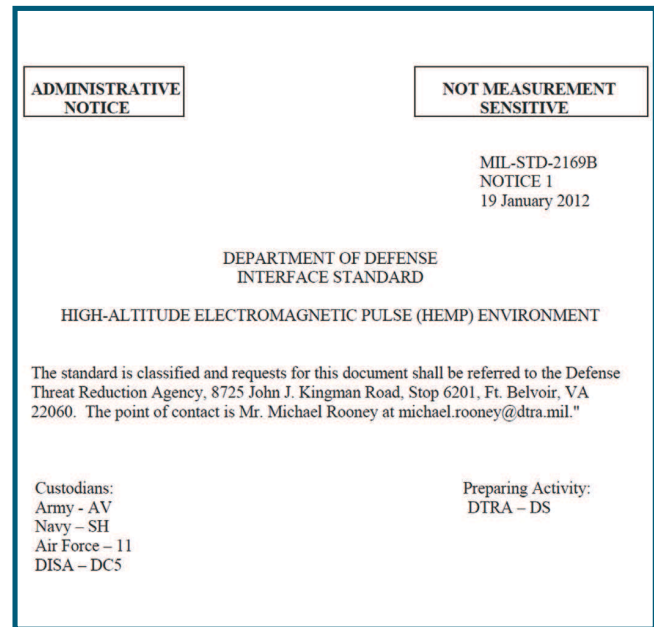


Рис. 26. Сведения о стандарте MIL-STD-2169DB, выдаваемые архивом США по запросу

## Литература

- IEC 61000-2-9 Electromagnetic compatibility (EMC) Part 2: Environment - Section 9: Description of HEMP environment - Radiated disturbance, 1996.
- Акбашев Б. Б., Балюк Н. В., Кечиев Л. Н. Защита объектов телекоммуникаций от электромагнитных воздействий - М.: Грифон, 2013. - 472 с.
- Report № EP 1110-3-2 Electromagnetic Pulse (EMP) and Tempest Protection for Facilities, Engineering Department of the Army, Washington, 1990.
- Louis W. Seiler, Jr. A Calculational Model for High Altitude EMP. Air Force Institute of Technology. Report AD-A009208. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio. March 1975.
- Study to Assess the Effects of Magnetohydrodynamic Electromagnetic Pulse on Electric Power Systems. - Report ORNL/sub-83/43374/1/v, Oak Ridge National Laboratory, 1985.
- Philip J. Dolan's Capabilities of Nuclear Weapons, DNA-EM-1 chapter 7, page 7-1 (change 1 page updates, 1978), report AD-A955391.
- Report AD-A144408. Evaluation of Methodologies for Estimating Vulnerability to Electromagnetic Pulse Effect. Washington, 1984.
- Glasstone S., Dolah P. J. The Effect of Nuclear Weapons. - US Department of Defense, Energy Research and Development Administration, Washington, 1977.
- EMP Engineering and Design Principles, Electrical Protection Department, Bell Telephone Laboratories, 1975.
- C.E. Baum, "From the Electromagnetic Pulse to High-Power Electromagnetics," Proc. IEEE, Vol. 80, No. 6, June 1992, pp. 789-817.
- K-D. Leuthäuser, "A Complete EMP Environment Generated by High-Altitude Nuclear Bursts: Data and Standardization," Theoretical Note 364, Air Force Phillips Laboratory, February 1994.
- VG95371-10 from Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Germany (replaces Edition 1993-08).
- Ghandehari M. B., Lotfi-Neyestanak A. A., Naser-Moghadasi M. Electromagnetic Pulse Coupling Inside a Rectangular Enclosure with an Aperture. - Journal of Electromagnetic Analysis and Applications, 2011, No. 3, pp. 84 - 89.
- Viel J. Testing for Immunity to EMP. - Compliance, 2010, 1 Jule.
- Leuthäuser K. D. A Complete EMP Environment Generated by High-Altitude Nuclear Bursts, Theoretical Note 363, October 1992..